

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ СЕНСОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТИПУ МАГНІТНИЙ – НЕМАГНІТНИЙ
МЕТАЛ**

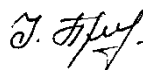
Студент гр. ЕП-61



С.Р. Долгов-Гордійчук

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, доцент



І. М. Пазуха

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2020

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітня програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ



І.Ю.Проценко

«12» травня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Долгова-Гордійчука Сергія Романовича

1. Тема роботи Чутливий елемент сенсора магнітного поля на основі композитних матеріалів типу магнітний – немагнітний метал

затверджена наказом по університету від «12» травня 2020 р. , № 0568-III

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 25 травня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

У композитних матеріалів типу магнітний – немагнітний метал виникають різні типи ефектів (ефекти анізотропного, гігантського магнітоопору, ефект Холла тощо), що дозволяє створити на їх основі різноманітні мініатюрні сенсори магнітного поля з низьким енергоспоживанням. Визначивши зміну сигналу на магніторезисторі, можна судити про переміщення, швидкість, або прискорення. Такі сенсори характеризуються великими значеннями чутливості плівкової системи, забезпечують високий рівень первинного сигналу, мають широкий діапазон робочих температур, надійність та точність передачі сигналу.

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в дослідженні магніторезистивних властивостей чутливого елемента сенсора магнітного поля, сформованого у вигляді плівкових систем на основі композитних матеріалів типу магнітний-немагнітний метал, та дослідженні впливу розмірного та температурних ефектів на характер і величину магніторезистивних ефектів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Загальна інформація про ефекти, що лежать в основі принципу роботи чутливих елементів сенсорів магнітного поля

2. Сучасні розробки датчиків на основі композитних матеріалів
 3. Методика формування та дослідження магніторезистивних досліджень композитних плівкових матеріалів магнітний – немагнітний метал.
 4. Обговорення експериментальних результатів
 5. Висновки
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- Слайди № 1-6 – Чутливі елементи сенсорів магнітного поля
- Слайди № 7-8 – Методика і техніка експерименту
- Слайди № 9-11 – Експериментальні результати
- Слайд № 12 – Висновки
6. Дата видачі завдання 27.04.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2020 р.	виконано
2.	Вивчення програмного забезпечення та методики проведення моделювання.	до 12.05.2020 р.	виконано
3.	Проведення розрахунків та моделювання властивостей плівкових матеріалів.	до 20.05.2020 р.	виконано
4.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 25.05.2020 р.	виконано
5.	Попередній захист роботи	27.05.2020 р., 9 ⁵⁰ (дистанційно)	виконано
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	03.06–05.06. 2020 р., 9 ⁵⁰ (дистанційно)	

Магістрант  С.Р. Долгов-Гордійчук

Керівник роботи  І.М. Пазуха

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в дослідженні магніторезистивних властивостей чутливого елементу сенсора магнітного поля, сформованого у вигляді плівкових систем на основі композитних матеріалів типу магнітний-немагнітний метал, та дослідженні впливу розмірного та температурних ефектів на характер і величину магніторезистивних ефектів.

Проведено аналіз літературних даних стосовно різних сенсорів неелектричних величин, сформованих на основі тонкоплівкових систем. Принцип дії даних сенсорів базується на різних типах ефектів: гігантському магнітоопорі, ефектах Холла, гігантського магнітного імпедансі.

Для формування чутливого елемента сенсора магнітного поля на основі композитних матеріалів типу магнітний – немагнітний метал була обрана методика одночасної конденсації з двох незалежних джерел у вакуумі. Метод високоточної резистометрії був використаний для проведення досліджень магніторезистивних властивостей.

У результаті проведених досліджень встановлено, що при кімнатній температурі можна отримати такі польові залежності магнітоопору, які майже повністю співпадають та не мають гістерезису. При цьому при зростанні величини прикладеного магнітного поля до 600 мТл величина МО зменшується майже лінійно. Для концентрації у 60 ат.% спостерігається ізотропний характер польових залежностей магнітоопору. Однак при збільшенні температури спостерігається спотворення графіків МО.

Робота викладена на 34 сторінках, зокрема містить 22 рисунка, 2 таблиці, список використаних джерел із 20 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДАТЧИКИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ, ЕФЕКТ ХОЛЛА, ЧУТЛИВІСТЬ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД).....	7
1.1. Загальна інформація. Ефекти, що лежать в основі принципу роботи чутливих елементів сенсорів магнітного поля.....	7
1.2. Сучасні розробки датчиків на основі композитних матеріалів.....	12
1.2.1. Сенсори магнітного поля.....	12
1.2.2. Датчики струму, тиску та інших неелектричних величин.....	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	21
2.1. Методика формування композитних плівкових матеріалів магнітний – немагнітний метал.....	21
2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей.....	23
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	27
3.1 Магніторезистивні властивості.....	27
3.2 Чутливість до змін магнітного поля.....	31
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

ВСТУП

На сьогоднішній день досить актуальним є проведення фундаментальних досліджень фізичних властивостей нових нанорозмірних функціональних матеріалів. Актуальною дана тема є в контексті розвитку елементної бази спінтроники. Дослідження та вивчення фізичних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів все ще є актуальною тематикою як фізики твердого тіла, так і матеріалознавства мікроелектроніки. У зв'язку з цим до таких матеріалів ставлять високі технологічні вимоги, такі як: чутливість або, навпаки, стабільність робочих характеристик до дії температури, деформації, магнітного поля, термічна стійкість структурно-фазового складу, тощо. Досягти таких вимог можна, підібравши методику та умови формування/створення плівкових матеріалів, а також під час самого процесу формування змінюючи товщину чи концентрацію атомів окремих компонент системи.

Так як у плівкових системах, на основі феромагнітних і благородних металів із спін-залежним розсіюванням електронів, досить часто може утворюватися явище гігантського магнітоопору (ГМО), яке досить широко використовується у приладобудуванні, то це спричинило нову хвилю як експериментальних, так і теоретичних досліджень властивостей цих систем.

Метою даної роботи було дослідження магніторезистивних властивостей чутливого елементу сенсора магнітного поля, сформованого у вигляді плівкових систем на основі композитних матеріалів типу магнітний-немагнітний метал, та дослідити вплив розмірного та температурних ефектів на характер і величину магніторезистивних ефектів.

РОЗДІЛ 1. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Загальна інформація. Ефекти, що лежать в основі принципу роботи чутливих елементів сенсорів магнітного поля

У металах і сплавах за кімнатної температури збільшення електричного опору при дії магнітного поля не перевищує 1 %. У феромагнетиках величина опору залежить від орієнтації вектора намагніченості \mathbf{M} відносно напрямку електричного струму в матеріалі. Цей різновид магнітоопору (МО) називають *анізотропним магнітоопором* (АМО).

Кількісною характеристикою АМО є магніторезистивний коефіцієнт $\Delta\rho/\rho$, який можна означити таким чином:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{\rho_l - \rho_t}{\frac{1}{3}\rho_l + \frac{2}{3}\rho_t}$$

де $\bar{\rho}$ - середнє значення питомого опору розмагніченого зразка.

Багатошарова АМР – структура має такий вигляд:

ФМ/НМ/ФМ, де ФМ – феромагнітна плівка, НМ – плівка немагнітного матеріалу з високим електричним опором. Залежність зміни опору ΔR анізотропної структури від кута φ між вектором намагніченості \mathbf{M} феромагнетика і напрямом електричного струму \mathbf{I} має вигляд

$$\Delta R = (\Delta\rho/\rho)R \cos^2 \varphi,$$

де $(\Delta\rho/\rho)$ - коефіцієнт магніторезистивного - ефекту.

На рисунку 1.1 наведена якісна схема механізму виникнення ГМО у тришаровій системі ФМ1/НМ/ФМ2 у результаті спін-залежного розсіювання електронів на інтерфейсах. Тут же наведені еквівалентні схеми провідності двома спіновими каналами з малим і великим опорами.

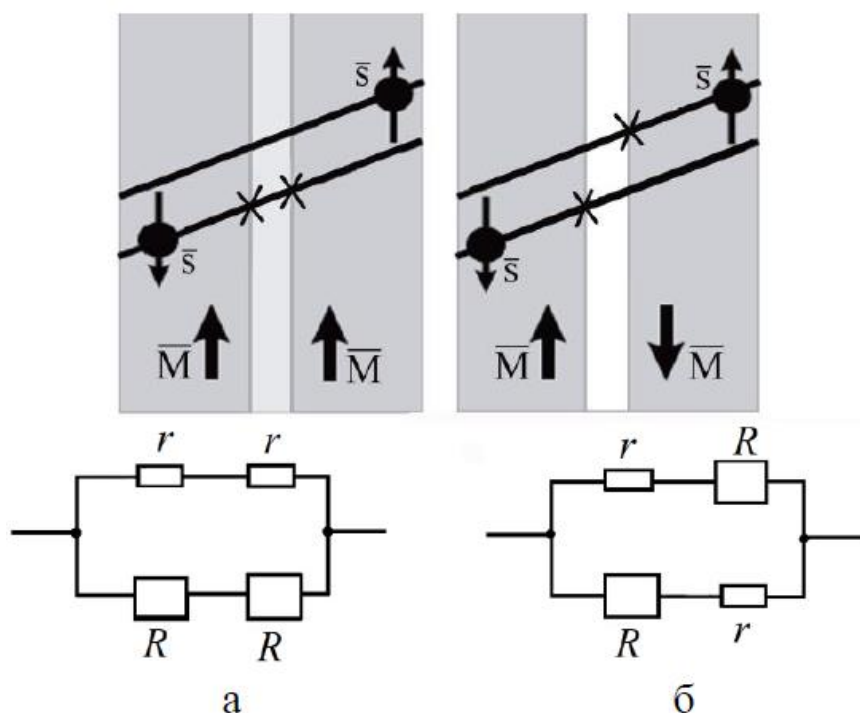


Рисунок 1.1 – Механізм виникнення ГМО на межі поділу шарів ФМ/НМ і НМ/ФМ та відповідні еквівалентні схеми провідності по низькоомному ($r + r$) та високоомному ($R + R$) спінових каналах: феромагнітна (а) та антиферомагнітна (б) орієнтації магнітних моментів. Із роботи [1]

Якісний опис явища гігантського магнітоопору. Перші повідомлення про великі значення магнітоопору в багатошарових F/N структурах з'явилися в 1988 – 1989 роках. Оскільки магнітоопір таких структур більше ніж на порядок величини перевищував магнітоопір відомих на той час феромагнітних матеріалів, він був названий гігантським магнітоопором (ГМО), а за багатошаровими F/N структурами закріпилася назва ГМО – структури або структури з гігантським магнітоопором.

В основі гігантського магнітоопору лежить взаємодія делокалізованих електронів, які переносять заряд, з локалізованими, які відповідають за формування магнітних моментів (так званий $s-d$ обмін). Така ситуація характерна для феромагнітних $3d$ металів та сплавів на їх основі. Результатом $s-d$ обміну є залежність ефективного перерізу розсіювання делокалізованих електронів від напрямку локалізованих магнітних моментів.

Гігантський магніторезистивний ефект – це чудовий приклад того, як структурування матеріалів на нанорівні обумовлює нові фундаментальні ефекти, що надають структурі додаткової функціональності.

СВП та СПП конфігурації ГМО структур. У минулому значна частина досліджень транспортних та магнітотранспортних властивостей багатошарових структур була виконана в конфігурації, показаній на рис. 1.2 (а). Вимірювання електричного опору виконувались по стандартній чотирьох точковій схемі, в якій всі контакти були під'єднані до площини плівки. Як результат, електричний струм головним чином протікав паралельно до площини шарів. Така конфігурація отримала назву СВП – конфігурація ГМО (Струм протікає В Площині плівки). Пізніше інтерес підсилювався до СПП геометрії, в якій Струм протікає Перпендикулярно до Площини плівки (рис. 1.2 (б)).

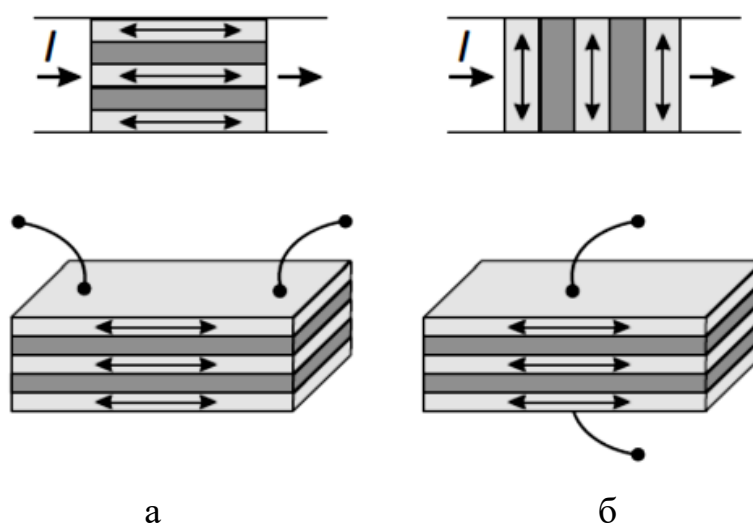


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення СВП (а) та СПП (б) конфігурацій ГМО структур. Стрілками показано можливі напрямки вектору намагніченості у феромагнітних шарах. Із роботи [2]

З точки зору практичних застосувань СПП геометрія має певні переваги, порівняно з СВП геометрією. Так, у першому випадку досягнуто значно вищі значення магнітоопору, легше зробити відведення теплоти, такі структури демонструють більше відношення сигнал/шум. Проте, є серйозні технологічні

труднощі при виготовленні СПП структур, а також при проведенні вимірювань. Справа в тому, що електричний опір у перпендикулярній геометрії дуже малий, тому для вимірювань необхідно використовувати або надпровідні контакти, або виготовляти зразки з великою кількістю шарів (і, відповідно, великою сумарною товщиною) і малим латеральним розміром. На даний час дослідження та технологічні розробки ведуться в обох геометричних конфігураціях, хоча перевага надається СПП геометрії.

Ефект Холла. Ефект Холла – явище, при якому виникає поперечна різниця потенціалів під час розміщення провідника з постійним струмом у магнітному полі.

У 1879 році Едвін Х. Холл виявив, що в присутності магнітного поля у провіднику створюється поперечна напруга, наслідком дії сили Лоренца на електронний струм. Невдовзі він також встановив, що у феромагнітних матеріалах ця поперечна напруга не просто пропорційна магнітному полю, як спостерігається в немагнітних провідниках, але характеризується додатковим внеском, пов'язаним з намагніченістю. Цей ефект сьогодні відомий як *аномальний ефект Холла*.

Аномальний ефект Холла пов'язаний зі спін-орбітальною взаємодією, яка спричинює поперечний рух носіїв заряду *в проміжках між актами розсіювання*. Цей механізм називають *внутрішнім спіновим ефектом Холла*. Механізми спін-асиметричного розсіювання і розсіювання спіну з бічним зміщенням, при яких поперечна швидкість чи зміщення генеруються у *процесі розсіювання* обумовлюють *зовнішній спіновий ефект Холла*. Різниця між внутрішнім та зовнішнім спіновими ефектами Холла є подібною до різниці між спіновою релаксацією через механізми Дзяконова - Переля і Елліота - Яфета, де спінова релаксація відбувається або між, або впродовж актів розсіювання, відповідно.

На рис. 1.3 схематично наведено три можливі внески в аномальний та спіновий ефекти Холла: (а) спін-асиметричне розсіювання, де спін-орбітальна взаємодія призводить до спін-залежного розсіювання з різними напрямками кінцевого імпульсу для спінів вгору і спінів вниз. У цьому випадку спінова

холлівська провідність $\sigma_{xy}^{SZ} \propto \tau$, де τ – час релаксації імпульсу; (б) розсіювання з бічним зміщенням, яке обумовлене спін-залежною різницею прискорення та сповільнення носія заряду впродовж розсіювання, і ефективно проявляється в спін-залежному бічному зміщенні при повторному розсіюванні, так що σ_{xy}^{SZ} не залежить від τ ; (в) внутрішні ефекти, де спін-орбітальна взаємодія в поєднанні з віртуальними між зонними переходами призводить до спін-залежної поперечної швидкості, так що σ_{xy}^{SZ} не залежить від τ .

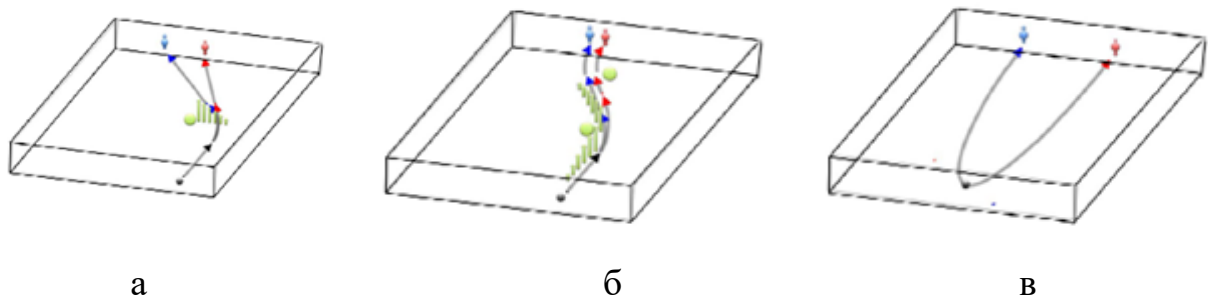


Рисунок 1.3 – Схематичне представлення різних механізмів, що обумовлюють спінову та аномальну провідності Холла: спін-асиметричне розсіювання (а); розсіювання з бічним зміщенням (б); внутрішній спіновий ефект Холла (в). Із роботи [2]

Квантовий ефект Холла виникає тоді, коли двовимірний електронний газ (2DEG), сформований, наприклад, електронами інверсного шару в МОН - структурі чи електронами в напівпровідниковій квантовій ямі, піддається дії сильного магнітного поля, перпендикулярного до площини 2DEG. Перпендикулярне магнітне поле змушує електрони рухатись по кругових циклотронних орбітах, радіуси яких зменшуються при збільшенні магнітного поля. Для достатньо великих магнітних полів, електрони в об'ємі зразка формують невеликі замкнуті циклотронні орбіти. З іншого боку, для електронів поблизу країв зразка простежуються витягнуті відкриті орбіти, що проходять уздовж краю.

Квантові ефекти стають помітними при низьких температурах. При цьому відбуваються два види подій. По-перше, площа замкнутих траєкторій в об'ємі

стає квантованою, об'ємні електрони стають локалізованими (оскільки вони проходять тільки невеликі замкнуті орбіти) і об'єм зразка перетворюється на ізолятор. По-друге, крайові орбіти формують протяжні одновимірні канали з квантованою провідністю e^2/h на кожен канал. Крім того, поперечна (холлівська) провідність σ_{xy} квантується кратно цілому (цілочисельний квантовий ефект Холла) або дробовому (дробовий квантовий ефект Холла) числу від e^2/h .

1.2. Сучасні розробки датчиків на основі композитних матеріалів

1.2.1. Сенсори магнітного поля

Датчик лінійного магнітного поля постійного та змінного струму на основі аморфних мікродротів зі скляним покриттям та гігантським магнітоімпедансом. Гігантський магнітоімпеданс (ГМІ) був вивчений в кількох структурах, таких як магнітні стрічки, дроти і мікродроти. Явище ГМІ пов'язано з скін-ефектом у магнітних провідниках. Коли зовнішнє магнітне поле взаємодіє з провідником, проникність сильно зростає таким чином, що глибина скін-шару зменшується.

Явище ГМІ забезпечує великі варіації імпедансу для слабких магнітних полів, що призводить до впровадження датчиків з високою чутливістю. Однак цей ефект також сильно нелінійний, і для отримання лінійного відклику потрібна деяка схема. Для цього можна розглянути діапазон магнітних полів між максимумом імпедансу і режимом насичення. У цьому регіоні є зона, яка є майже лінійною. Проте, лінійність може бути поліпшена шляхом об'єднання відклику двох мікродротів. Цей процес вимагає, щоб відклики мікродротів були зрушені за допомогою двох полів зсуву в протилежних напрямках. Це може бути легко отримано при використанні двох котушок, сконфігурованих у послідовній опозиції, як показано на рис. 1.4. Нарешті, лінеаризований відклик виходить через різницю обох відкликів.

Загалом, необхідна схема заснована на блок-схемі на рис. 1.5. Вона починається з джерела струму, яке збуджує мікродроти, кожен з яких поляризований магнітним полем зміщення постійного струму. Нарешті, два відклики віднімаються диференціальним підсилювачем, який також встановлює бажане посилення для настройки загальної чутливості датчика.

Було розроблено датчик ГМІ, що представляє цікаві особливості порівняно з наявними у продажі датчиками магнітного поля завдяки його більш високій чутливості і незначному гістерезису. Недоліком є те, що датчик ГМІ працює в більш низькому частотному діапазоні, хоча більш високі смуги пропускання можуть бути досягнуті шляхом поліпшення схеми формування сигналу.

Технологія мініатюрних магнітних датчиків є швидко розвиваємою галуззю. Відносно нова технологія магнітних датчиків, заснована на магнітоімпедансному (МІ) ефекті може перевершити деякі інші системи датчиків з точки зору продуктивності і низької вартості.

Інтегрована тонкоплівкова сенсорна головка МІ була сконструйована в [5] з комбінацією м'яких магнітних плівок NiFe, постійного магнітного зміщення і котушок з від'ємним зворотним зв'язком за допомогою технології мікропокрытия. Головка датчика показала дуже високу чутливість виявлення поля - близько 33%/Е при намагнічуванні імпульсним струмом. Модуль датчика диференціального типу може бути сконструйований з використанням пари тонкоплівкових сенсорних головок МІ.

Технологія формування структур для електронних пристроїв з використанням технології іонних треків є дуже перспективною. Взаємодія високоенергетичних іонів з речовиною викликає утворення протяжних областей радіаційного ушкодження в поверхневому шарі, а подальше травлення прихованих слідів призводить до утворення нанопор, форми і розміри яких визначаються параметрами опромінення і травлення. Нанопори доцільно створювати в шарі SiO₂, на підкладці Si, у зв'язку з органічної адаптацією отриманих структур до стандартної кремнієвої технології. Після вибіркового

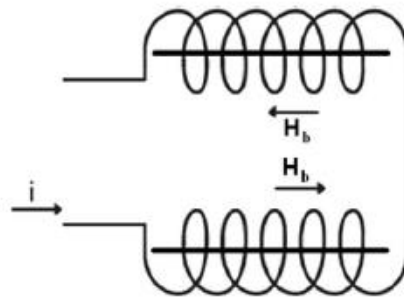


Рисунок 1.4 – Польові котушки зміщення постійного струму, що з'єднані послідовно, та призначені для зміщення відклику ГМІ двох мікродротів в протилежних напрямках. Із роботи [3]



Рисунок 1.5 – Загальна структурна схема сенсорного ланцюга відклику аморфних мікродротів. Адаптовано із роботи [3]

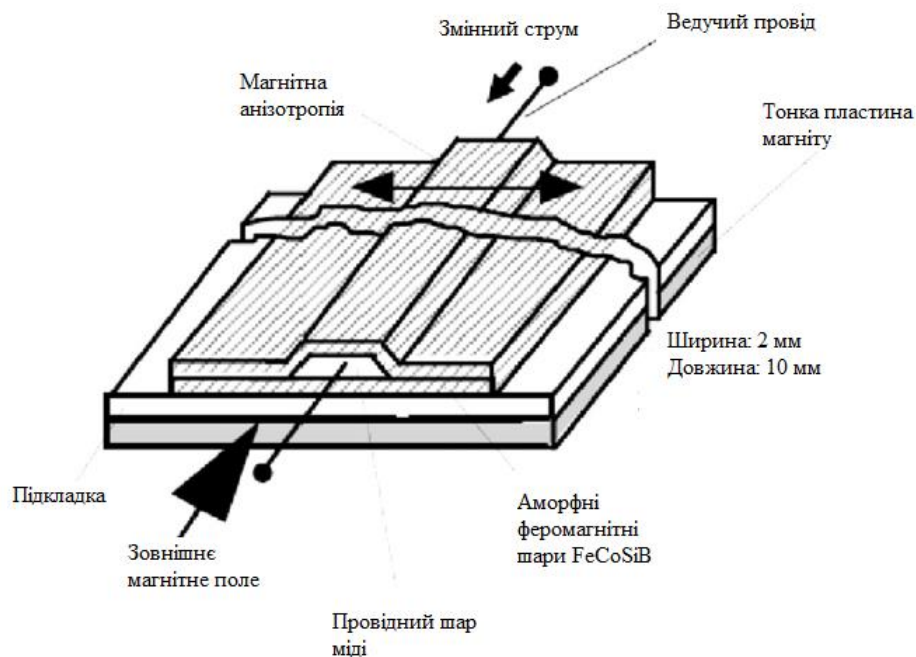


Рисунок 1.6 – Багатошарова сенсорна головка МІ. Адаптовано із роботи [4]

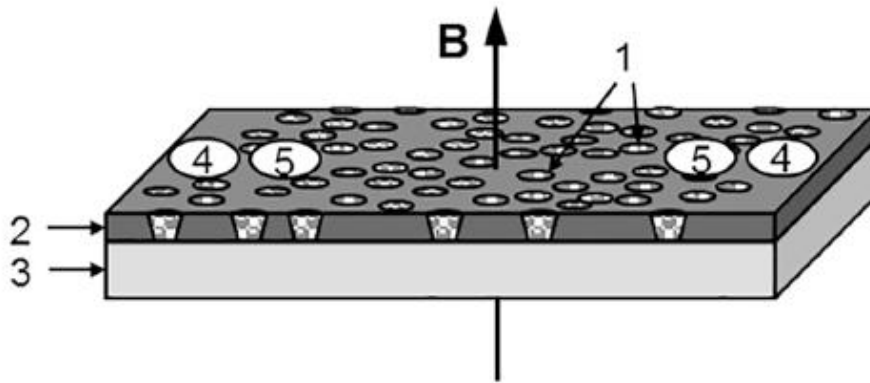


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення наносистем $\text{SiO}_2(\text{Ni})/\text{Si}$. (1) – метал в порах; (2) – шар оксиду кремнію; (3) – кремнієва підкладка; (4) – поточні контакти; (5) – потенційні контакти. Із роботи [6]

заповнення пір металом утворюються наносистеми, що мають різні електричні характеристики. Наносистеми $\text{SiO}_2(\text{метал})/\text{Si}$ мають магнітоопір (МО) 1000% при температурі нижче 50 К. Велике значення МО при температурі кипіння водню вказує на перспективи використання структури у космічній техніці та приладах, що працюють під іонізуючим випромінюванням.

Волоконно-оптичний датчик магнітного поля, що використовує магнітну рідину в якості оболонки, описаний у роботі [7]. Магнітна рідина (МР) є різновидом стабільної колоїдної системи, що складається з магнітних наночастинок, покритих поверхнево-активною речовиною, диспергованих у відповідному рідкому носії. Вона має як особливості магнітних властивостей твердих магнітних матеріалів, так і текучості рідин. Таким чином, МР володіє універсальними магнітооптичними властивостями, такими як показник заломлення, що настраюється, зміна об'єму і магніто діелектрична анізотропія.

Для реалізації чутливої функції використовувалися різні структури, наприклад, волоконні структури з конусоподібними сполуками, одномодові, багатомодові, одномодові (SMS) волоконні структури, одномодові (SMF) інтерферометри Майкельсона, фотонно-кристалічні волокна (PCF) та ін.

На рис. 1.8 приведена принципова схема пропонованої сенсорної конструкції.

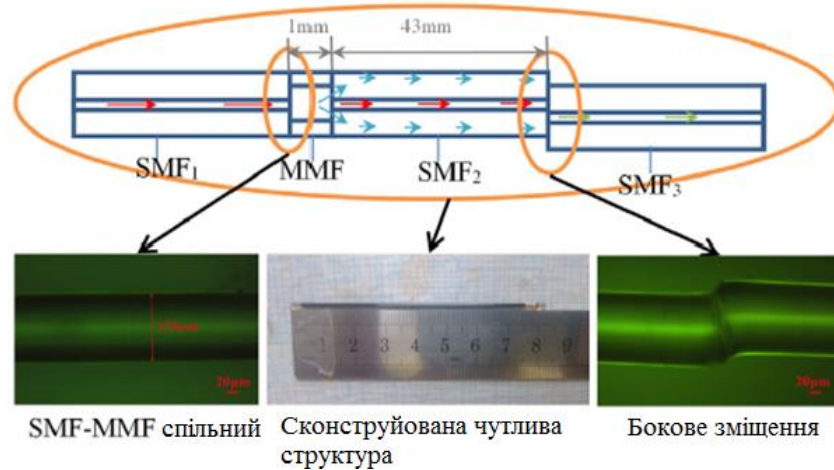


Рисунок 1.8 – Схема запропонованої чутливої структури. Адаптовано із роботи [7]

Датчики на основі анізотропного магнітоопору (АМО) і планарного ефекту Холла (ПЕХ) представляють собою активну область розробки, їх основне застосування - в областях, які вимагають високої чутливості і невеликого розміру.

Найпростішою сенсорною архітектурою, в якій використовується плоский ефект Холла, є суцільна плівка з анізотропного магніторезистивного матеріалу [8, 9], такого як CoFe або NiFe, нанесена на відповідну підкладку. Основним недоліком цих конструкцій датчиків є неадекватна розв'язка між звичайним опором і плоским опором Холла, що призводить до значного напруження спокою в робочій точці. Проблема вирішується шляхом виготовлення стрижнів Холла з чутливого матеріалу [10].

Двома потенційними областями застосування є визначення геомагнітного поля і виявлення магнітних аномалій.

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) надають особливо перспективний клас датчиків магнітного поля для вимірювання струму на основі близькості. Хоча це також може бути реалізовано в макромасштабі, висока мініатюризація, відтворюваність і точність при виготовленні великих обсягів, а також упаковка в рішення на рівні системи роблять МЕМС надзвичайно привабливими для датчиків магнітного поля.

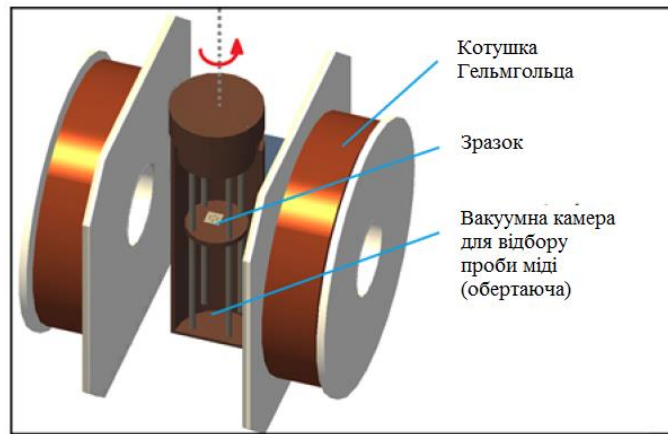


Рисунок 1.9 – Принципова схема установки, використовуваної для залежних від кута вимірювань. Адаптовано із роботи [11]

Найбільш обмежуючим фактором для успішної мініатюризації і оптимізації продуктивності датчиків на основі постійних магнітів в технології MEMS є наявність та інтеграція об'ємних постійних магнітних матеріалів. З недавніми розробками стала можлива інтеграція матеріалів на основі порошку в процесі виготовлення MEMS. Ці розробки дозволяють інтегрувати твёрдомагнітний порошок для створення необхідних об'ємних постійних магнітів.

Датчики магнітного поля на основі магнітних порошків були виготовлені з використанням 200-мм пластини кремнію. На рис. 1.10 наведено схематичний технологічний процес виготовлення у перерізі. Мова йтиме про два датчика з різною геометрією кантилеверів, які позначені I і II відповідно. Зображення датчиків в зібраному стані на рис. 1.11 (а) і (б).

1.2.2 Датчики струму, тиску та інших неелектричних величин

Датчики струму з високою точністю і чутливістю все частіше потрібні для великих застосувань. Основними методами вимірювання струму є: шунтуючі резистори, трансформатори струму, масла Роговського, датчики Холла і перетворювачі з флюсгейтом [15].

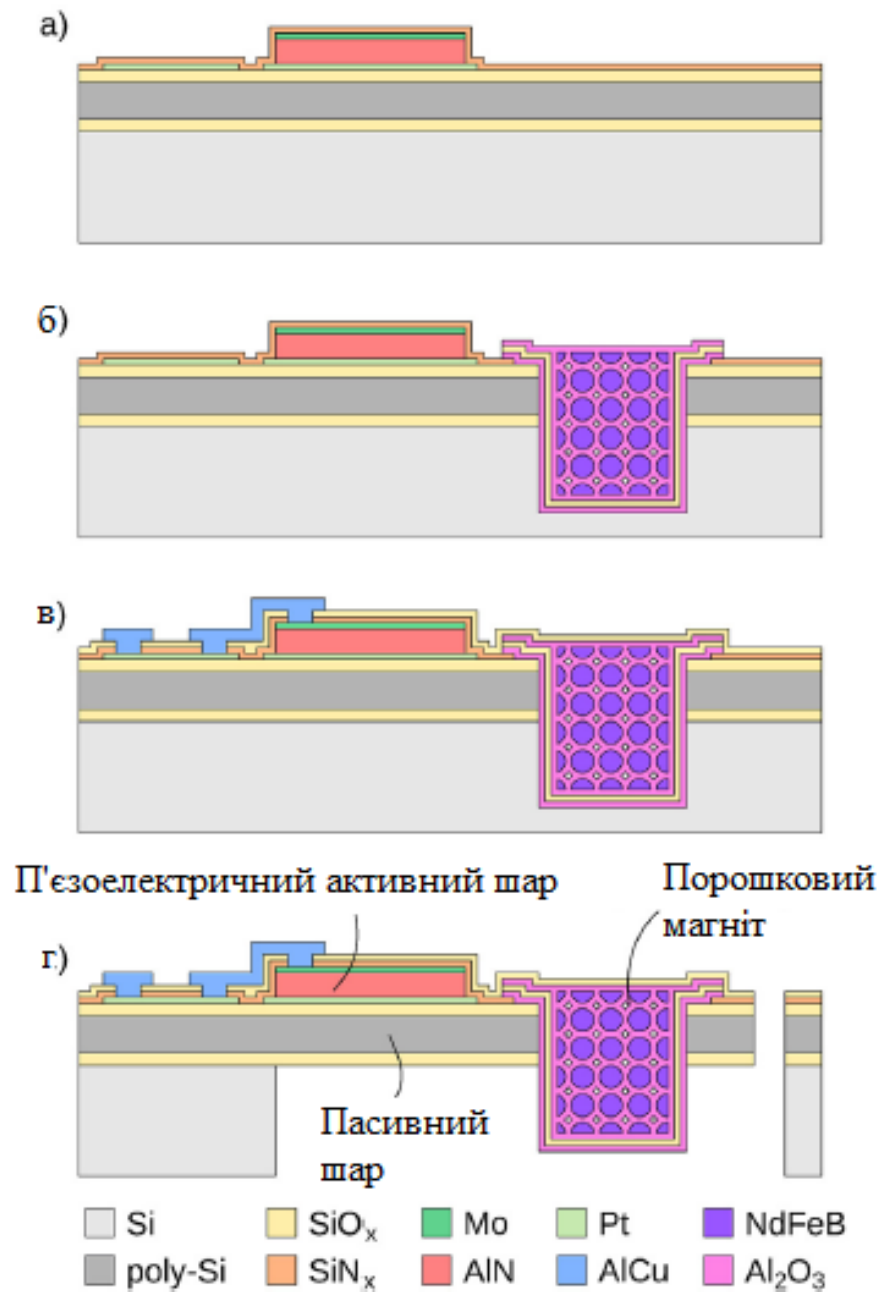


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення використовуваної технології виготовлення MEMS-датчиків магнітного поля з інтегрованими постійними магнітами на основі порошку: (а) Готовий п'єзoeлектричний шар укладають на шар пасивного полікристалічного кремнію, захищеного шаром нітриду кремнію, (б) інтеграція порожнин постійних магнітів на основі порошку, витравлених в підкладку, (в) розводка пакета п'єзoeлектричних шарів після захисту постійного магніту додатковим шаром SiO₂, (г) вивільнення кантілверів. Адаптовано із роботи [12]

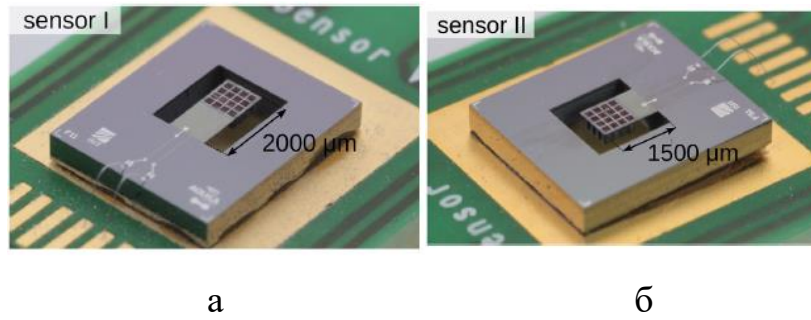


Рисунок 1.11 – Фотографії виготовлених пристроїв: (а) датчик I і (б) датчик II [12]

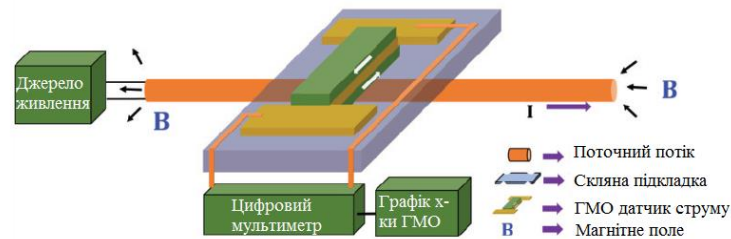


Рисунок 1.12 – Загальна схема системи для датчика струму. Адаптовано із роботи [13]

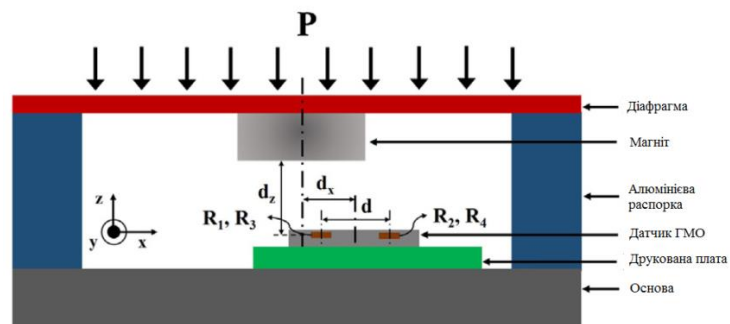


Рисунок 1.13 – Ілюстрація механізму вимірювання магнітного тиску. Адаптовано із роботи [14]

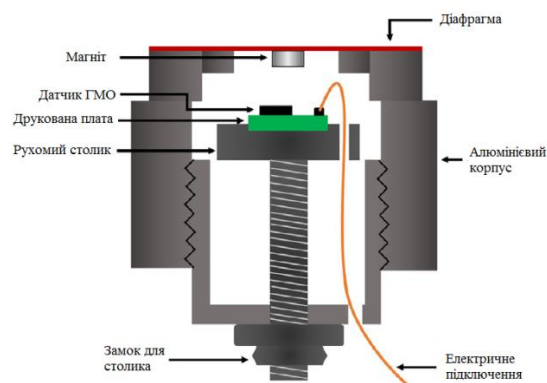


Рисунок 1.14 – Схема датчика-прототипу. Адаптовано із роботи [14]



а



б

Рисунок 1.15 – Фотографії: (а) датчика ГМО з друкованою платою, встановленої на рухомій платформі; (б) виготовленого датчика тиску. Із роботи [14]

Датчики струму на основі ГМО широко використовуються у вимірах струму, вони неінтрузивні і мають гальванічну розв'язку. Датчики струму на основі ГМО особливо переважні через їх малій обсяг, розумну ціну і за рахунок безконтактного вимірювання.

Магнітні датчики тиску використовують твердотільний магнітний датчик на основі ефекту Холла або магнітоопору і постійний магніт [16-18]. Було повідомлено про датчик тиску, в якому є тонкий елемент Холла, сформований на кремнієвій мембрані, що діє як діафрагма, а постійний магніт використовується в якості джерела поля.

Прототип датчика тиску виконаний в алюмінієвому корпусі. Зовнішні розміри алюмінієвого корпусу були зроблені сумісними з існуючими монтажними отворами на аеродинамічній поверхні для дослідження аеродинамічної труби. Корпус містить рухливу рампу з прорізом, в якій датчик ГМО з друкованою платою був встановлений не по центру щодо осі магніту. Принципова схема розробленого прототипу датчика тиску наведена на рис. 1.14. На рис. 1.15 наведені фотографії виготовленого датчика тиску.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика формування композитних плівкових матеріалів типу магнітний – немагнітний метал

Стояла задача сформувати композитний плівковий матеріал типу магнітний – немагнітний метал з метою формування на його основі чутливого елемента сенсора магнітного поля. Як феромагнітний матеріал був вибраний сплав пермалой $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, а як немагнітна компонент – срібло. Конденсація зразків проводилася методом одночасного електронно-променевого випарування. Дослідження магніторезистивних властивостей сформованих систем проводилось з метою встановлення особливостей польових залежностей магнітоопору у залежності від загальної товщини системи та від процесу термообробки для визначення оптимальних параметрів для формування термостабільних сенсорів магнітного поля.

Напилення плівок проводилось одразу у вакуумній камері установки ВУП-5М (рис. 2.1). Осадження проводилось на ситалові підкладки, методом електронно-променевого випаровування. Електронно-променеві гармати, з водяним охолодженням, використовувались як випарники матеріалів. Причому дані гармати дещо відрізнялись одна від одної у конструкції: так для випаровування пермалою у гарматі було нижнє розташування аноду, а для випаровування срібла – верхнє. Це пов'язано з тим, що у пермалою та срібла різні температури плавлення/кипіння, тому при однакових умовах випаровування могло не відбутися.

Контроль товщини осадження металу здійснювався за допомогою кварцових резонаторів. Для розрахунку товщини тонкої плівки використовувалась формула:

$$d = \frac{N_q \rho_q}{\rho_f f^2} \cdot (f_q - f)$$

де N_q – частотна стала для сколу кварцового кристалу, $N_q = 1,668 \cdot 10^5$ Гц * см; ρ_q, ρ_f – густина плівки та кварцу відповідно, $\rho_q = 2,65$ г/см³; f_q, f – резонансні частоти кварцової пластини до та після осадження на неї плівки відповідно.

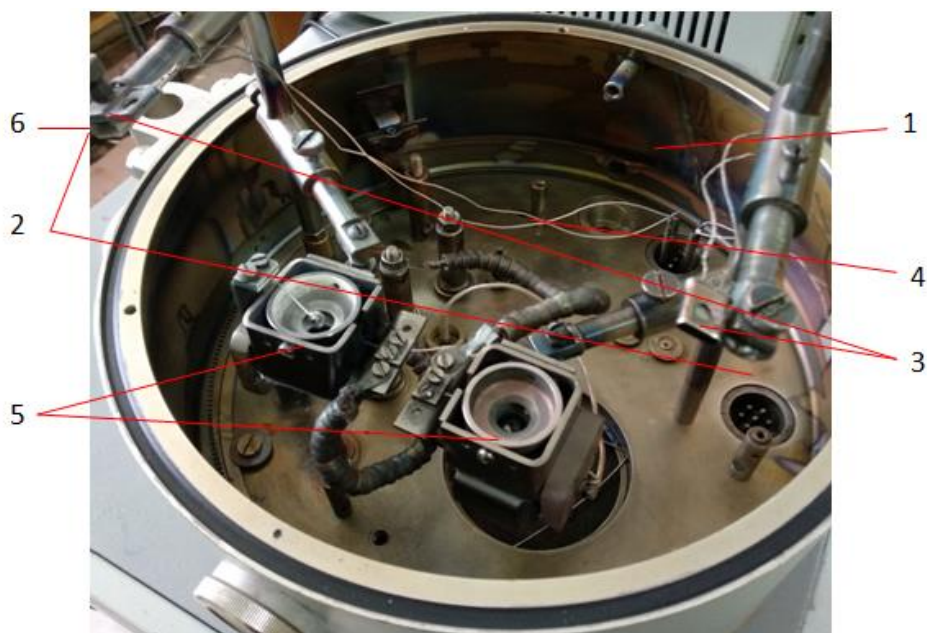


Рисунок 2.1 – Фотознімок робочої камери приладу ВУП-5М: 1 – робоча камера; 2 – підкладкотримач; 3 – кварцовий резонатор для контролю товщини; 4 – термопара для контролю температури підкладки; 5 – електронно-променеві гармати для пошарової конденсації в одному технологічному циклі; 6 – підкладка з ситалу

Використання методу одночасної конденсації обумовлено можливістю формування в одному технологічному циклі серії таких зразків, у яких концентрація компонент змінюється в досить широкому інтервалі. Для реалізації цього методу було виготовлено підкладкотримач, у вигляді металевієї пластини з зажимами, які закріплювали самий край куточка підкладок, на які проводилось напilenня. Так як конденсувались одразу всі зразки, то на підкладкотримач (між кварцових резонаторів) було розміщено 6 підкладок.

Виходячи з геометрії розташування випарників, підкладок та кварцових пластин, здійснювався розрахунок ефективної товщини окремих компонент для заданої точки підкладки П за співвідношенням для точкового випарника:

$$d_1 = d_{01} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_1}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad d_2 = d_{02} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_2}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}$$

де d_0 – товщина плівки в точці над випарником.

2.2 Методика дослідження магніторезистивних властивостей

Так як після конденсації потрібно було вимірювати магнітоопір, то підкладки на які проводилось напилення, намагались зробити якомога однаковими, з геометричними розмірами 10x10 мм.

З метою визначення впливу температури на магніторезистивні властивості, всі зразки проходили термообробку за схемою «нагрівання → витримка при заданій температурі протягом 20 хв. → охолодження до кімнатної температури». Процес термообробки здійснювався при використанні мідного столику із площею рівномірного прогріву 20 см². Це дозволяло розміщувати на його поверхні одночасно до 20 зразків та проводити їх термообробку за ідентичних умов. Рівномірний прогрів столику та зразків забезпечувався використанням екранів та мінімальним контактом даної конструкції зі стінками вакуумної камери. Контакт термопари при цьому фіксувався безпосередньо на ситаловій пластині такого ж розміру, як і ті, на які було сконденсовано досліджувані плівкові системи.

Дослідження магніторезистивних властивостей сконденсованих зразків проводилось для станів: при кімнатній температурі 300 К та після відпалювання зразка до 500 К та до 700 К. Дослідження проводилось при використанні чотирьох точкової схеми вимірювання електричного опору у змінному магнітному полі. Необхідне магнітне поле забезпечувалось досить габаритними

електромагнітами, при цьому максимальна величина магнітної індукції B виставлялась в 600 мТл. Зразок, що досліджувався закріплювався на підкладкотримач з притискними контактами, який у свою чергу був

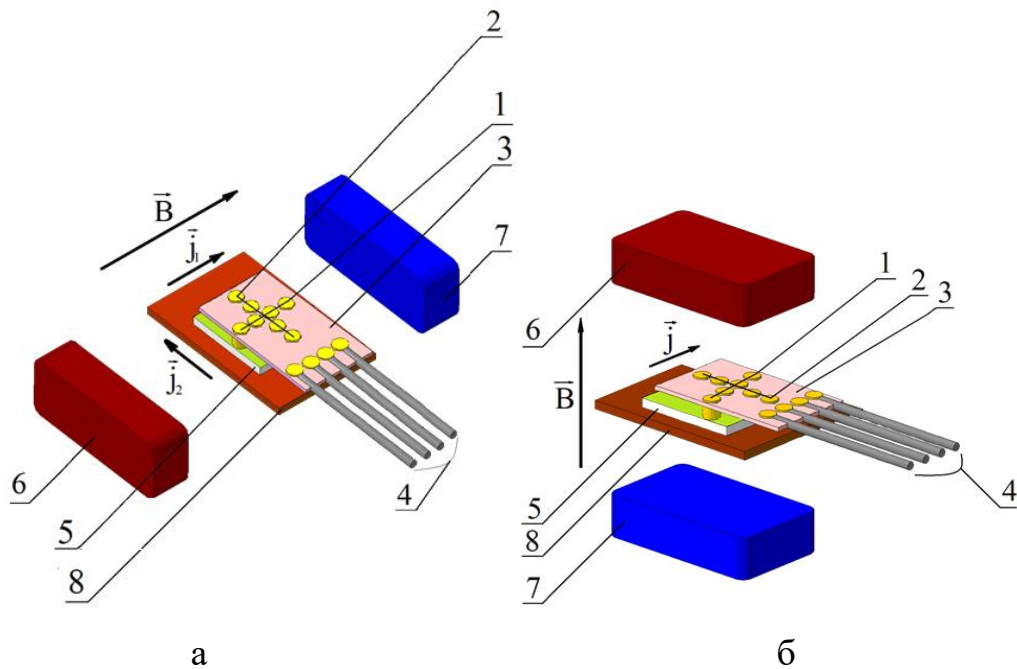


Рисунок 2.2 – Схематичне підключення контактів та розташування зразка відносно полюсів магніту при вимірюванні магнітоопору у поздовжній і поперечній (а) та перпендикулярній (б) геометрії вимірювання: 1, 2 – притискні контакти; 3 – підкладка з притискними контактами; 4 – виводи для підключення омметра; 5 – досліджуваний зразок; 6, 7 – електромагніти; 8 – підкладко тримач. Із роботи [19]

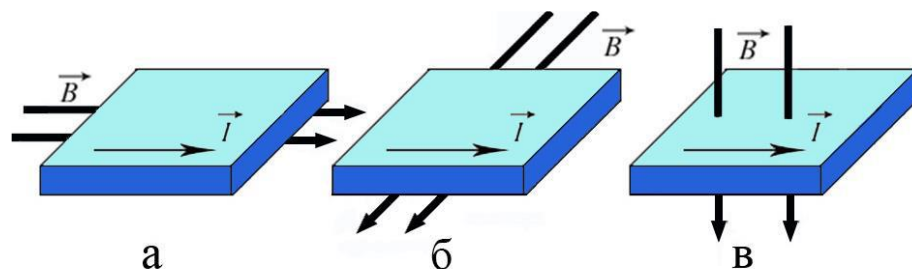


Рисунок 2.3 - Схеми поздовжньої (а), поперечної (б) та перпендикулярної (в) геометрій вимірювання магнітоопору

закріплений на поворотній вісі та розміщувався між сердечниками магніту. За рахунок закріплення на поворотній вісі підкладкотримач мав можливість обертатися, змінюючи кут між площиною зразка та напрямком ліній магнітної індукції (рис. 2.2). Це дало можливість проводити вимірювання в трьох геометріях: поперечній перпендикулярній та поздовжньої (рис. 2.3).

Для розрахунку величини магнітоопору використовувалися співвідношення (2.1) для зразків, у яких спостерігався ефект ГМО, та співвідношення (2.2) для зразків, в яких спостерігалася гістерезисна польова магніторезистивна залежність:

$$MO = \frac{\Delta R}{R_S} = \frac{R(B) - R(B_S)}{R(B_S)}, \quad (2.1)$$

$$MO = \frac{\Delta R}{R(B_{max})} = \frac{R(B_{max}) - R(B)}{R(B_{max})}, \quad (2.2)$$

де $R(B)$ – опір плівки при заданому полі; $R(B_S)$ – опір плівки при полі насичення B_S ; $R(B_{max})$ – опір плівки при максимальному полі B_{max} .

Визначення чутливості плівкових систем до магнітного поля.

Були проведені розрахунки чутливості плівкових систем до магнітного поля за співвідношенням

$$S_B = \left| \frac{(\Delta R / R(B_S))_{\max}}{\Delta B} \right|, \quad (2.3)$$

де $\Delta R / R(B_S)$ – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (або максимального значення) B_s до розмагнічування B_c , величина якої фактично дорівнює $\Delta B = B_s + B_c$ (рис. 2.4)

Величина S_B вимірюється в %/Тл (або в %/(кА/м)) і свідчить про співвідношення величин магнітоопору та поля насичення.

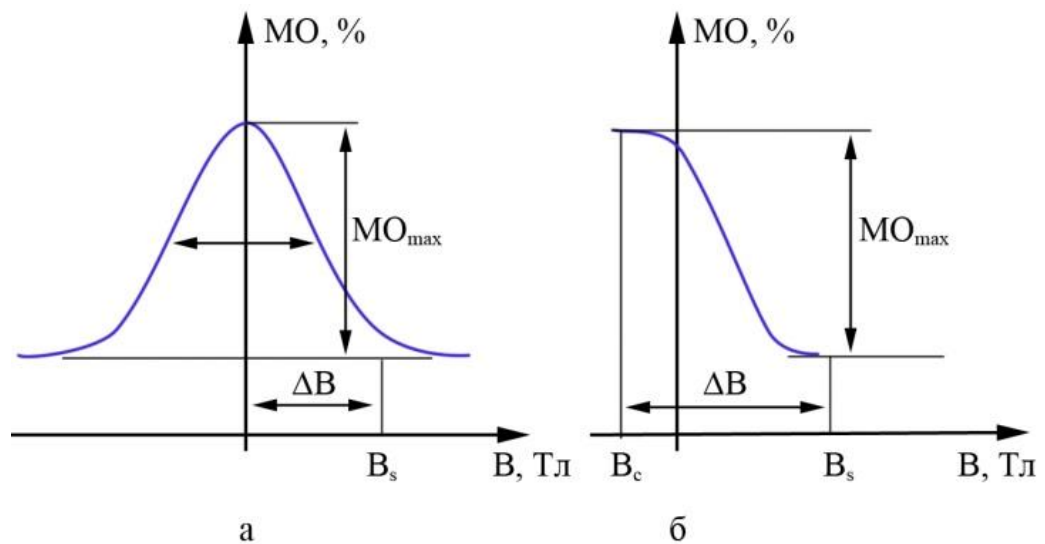


Рисунок 2.4 – Схема визначення чутливості до магнітного поля для випадку магніторезистивної залежності без (а) і з гістерезисом (б). Із роботи [20]

Під час формування чутливих елементів сенсорів істотне значення має здатність робочого елемента реагувати на зміну прикладеного магнітного поля, незалежно від його орієнтації, а також величина чутливості до магнітного поля (S_B). Ці умови необхідні для забезпечення швидкого реагування робочого елемента, сформованого на основі плівкових систем на зміну вхідного сигналу, а також для наявності високої точності вимірювання при детектуванні слабких полів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Магніторезистивні властивості

Свіжосконденсовані плівкові системи на основі феромагнітного сплаву пермалою та срібла мають, як ізотропний, так і анізотропний магнітоопір. При цьому величина магнітоопору залежить від умов осадження, загальної товщини отриманих плівок, концентрації компонент та умов термообробки.

В даній роботі всі зразки мають концентрацію $c_{Ag} = 60$ ат.%

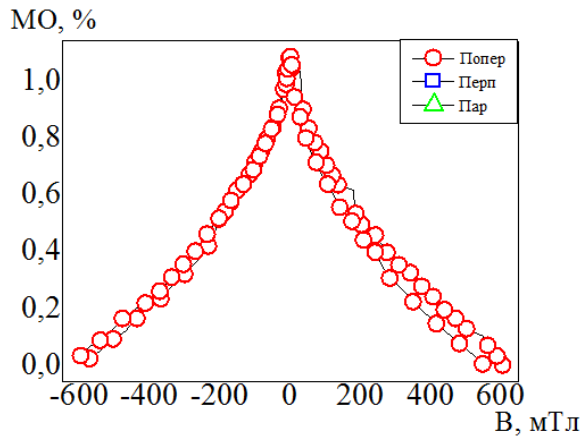
Польові залежності для поздовжньої, поперечної та перпендикулярної геометрій для свіжосконденсованих тонкоплівкових систем на основі Pu та Ag , товщиною 60 та 100 нм представлені на рисунку 3.1

Концентрація $c_{Ag} = 60$ ат.% дозволяє отримати такі польові залежності магнітоопору, які майже повністю співпадають та не мають гістерезису. При цьому при зростанні величини прикладеного магнітного поля до 600 мТл величина МО зменшується майже лінійно. Для даної концентрації спостерігається ізотропний характер польових залежностей магнітоопору.

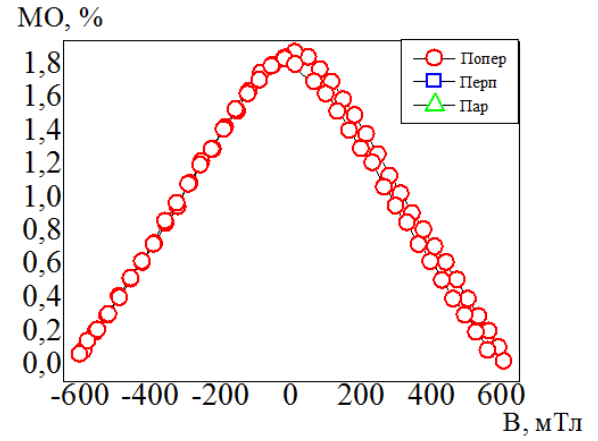
Рисунки 3.2, 3.3 ілюструють зміну характеру польових залежностей МО у поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометріях у процесі термообробки до 500 і 700 К.

Таблиця 3.1 – Величина МО для плівкових систем на основі пермалою $Ni_{80}Fe_{20}$ та Ag до та після термовідпалювання до 500 та 700 К

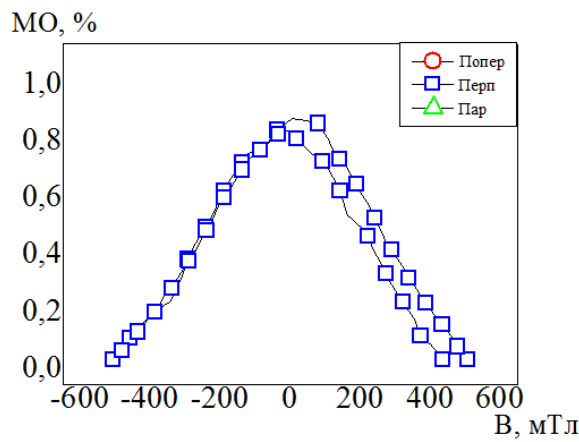
Зразок	МО, %								
	Поздовжня геометрія			Перпендикулярна геометрія			Поперечна геометрія		
	300	500	700 К	300	500	700 К	300	500	700 К
60 нм	0,95	0,41	0,32	0,86	0,89	0,85	1,1	0,83	0,45
80 нм	1,45	0,4	0,22	1,41	0,96	0,74	1,58	0,78	0,32
100 нм	1,75	1,2	0,67	1,76	1,25	1,14	1,86	0,85	0,59



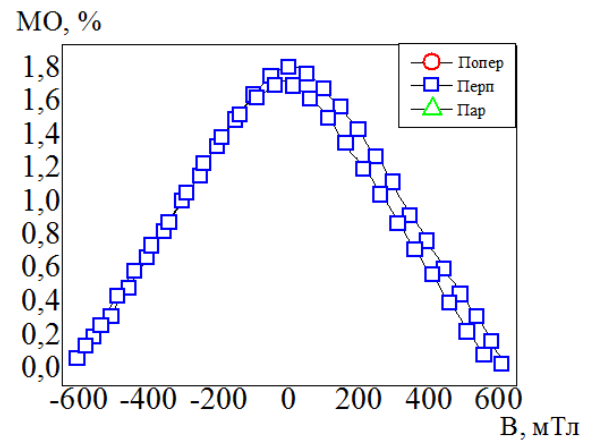
а



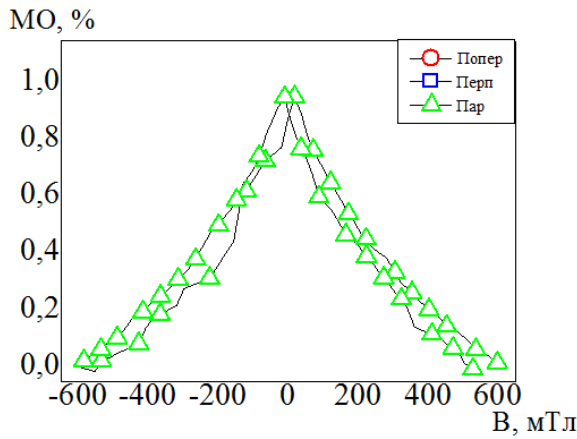
б



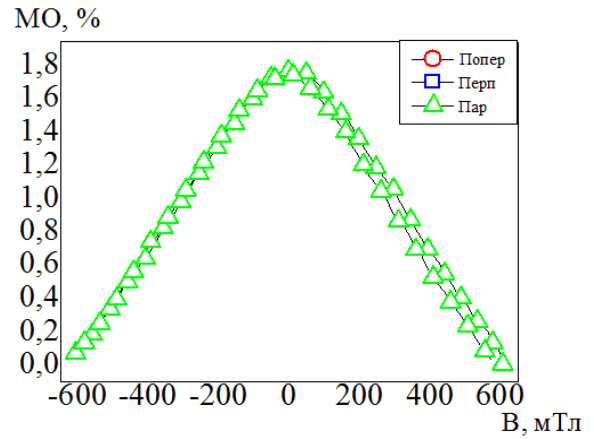
в



г

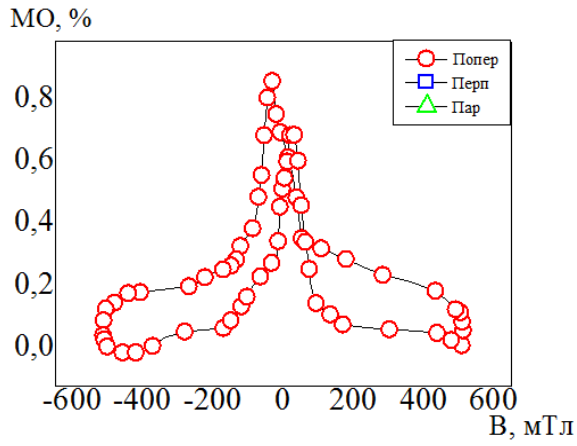


д

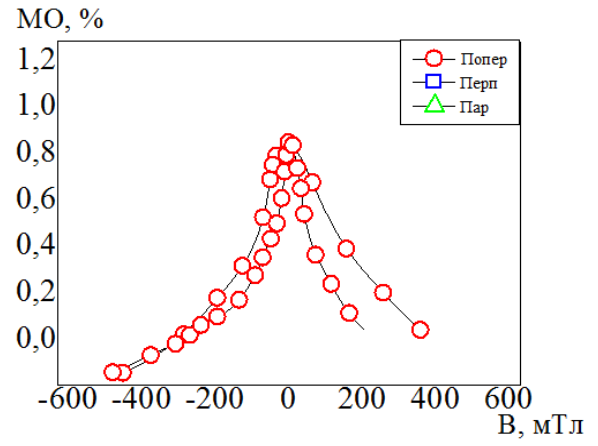


е

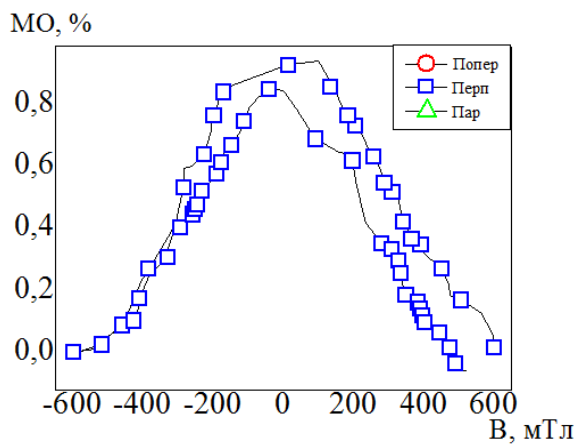
Рисунок 3.1 – Польові залежності магнітоопору для плівкових систем на основі пермалою та срібла, товщиною 60 (а, в, д) та 100 нм (б, г, д), у свіжосконденсованому стані для трьох геометрій вимірювання (● – поперечна (а, б), ■ – перпендикулярна (в, г), ▲ – поздовжня (д, є))



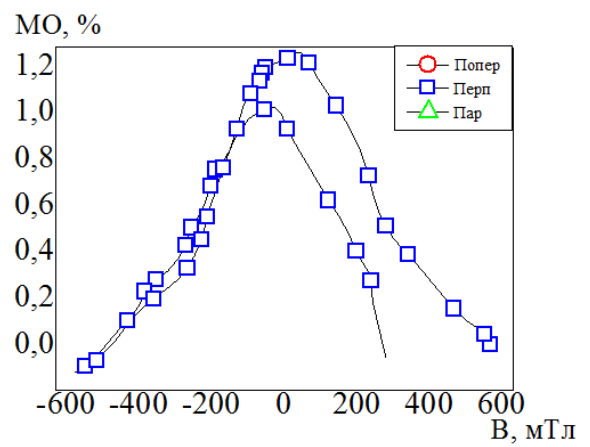
а



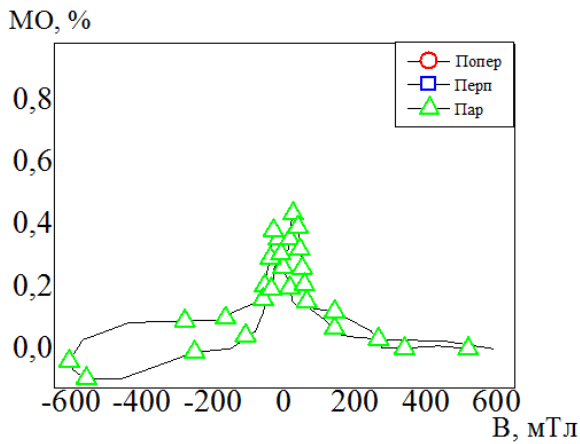
б



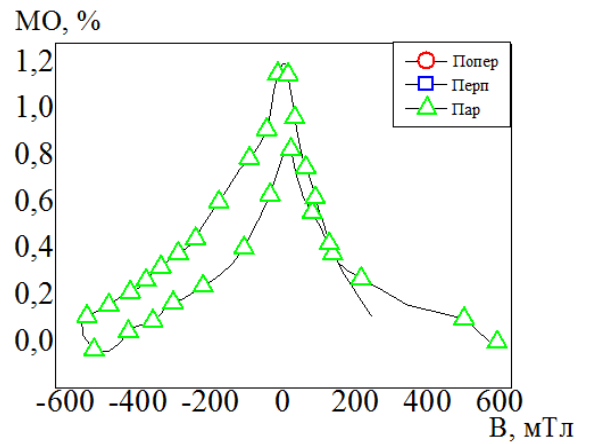
в



г

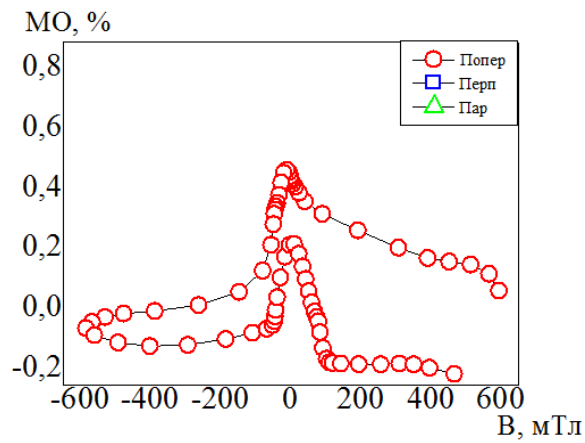


д

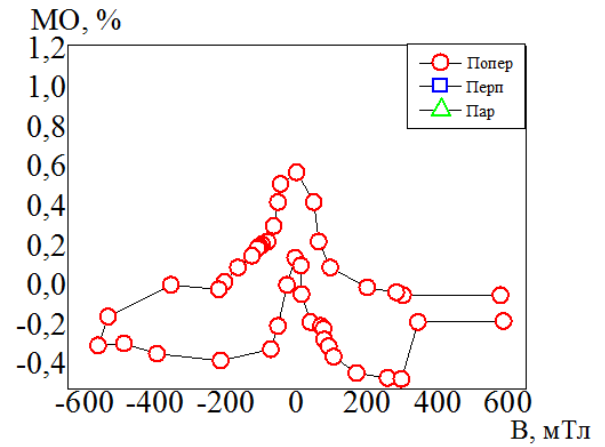


е

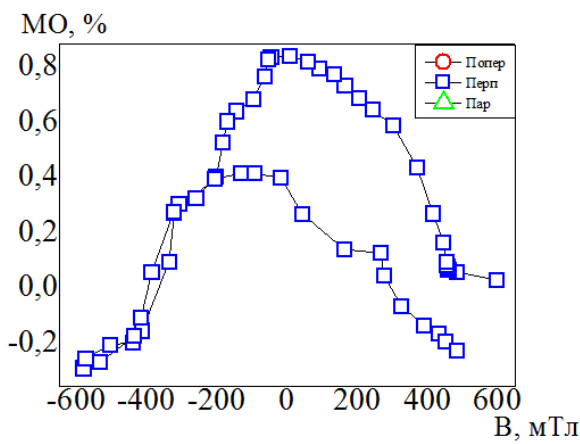
Рисунок 3.2 – Польові залежності магнітоопору для плівкових систем на основі пермалою та срібла, товщиною 60 (а, в, д) та 100 нм (б, г, д), після відпалювання до 500 К для трьох геометрій вимірювання (● – поперечна (а, б), ■ – перпендикулярна (в, г), ▲ – поздовжня (д, є))



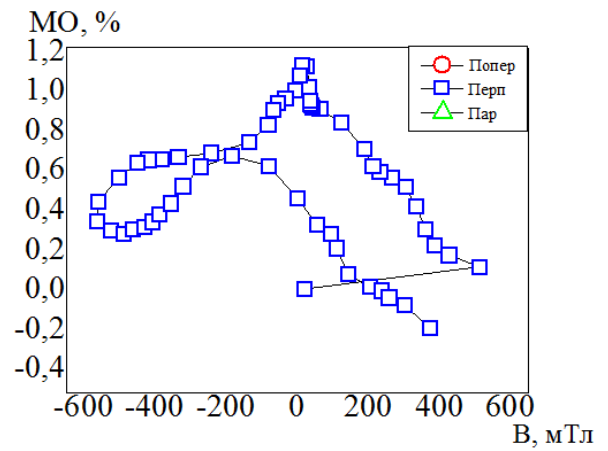
а



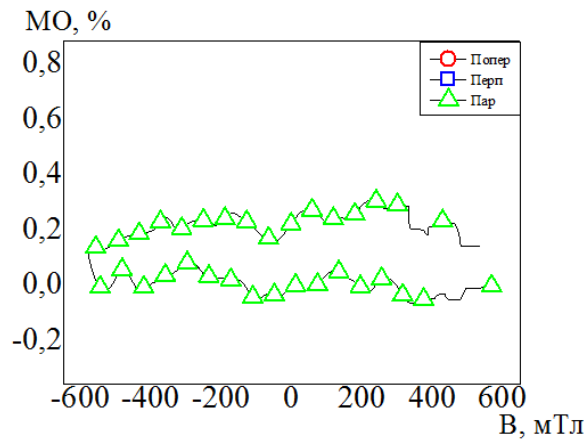
б



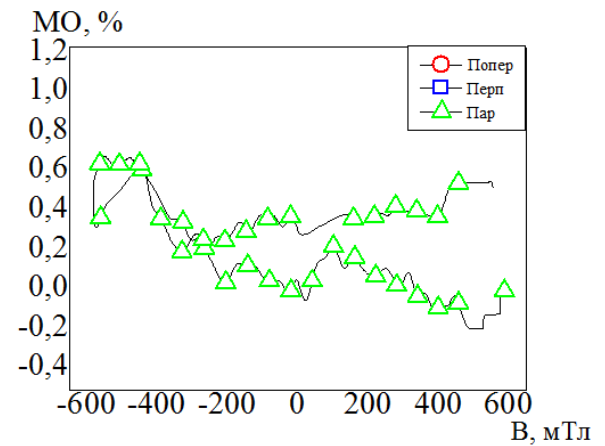
в



г



д



е

Рисунок 3.2 – Польові залежності магнітоопору для плівкових систем на основі пермалою та срібла, товщиною 60 (а, в, д) та 100 нм (б, г, д), після відпалювання до 500 К для трьох геометрій вимірювання (● – поперечна (а, б), ■ – перпендикулярна (в, г), ▲ – поздовжня (д, є))

Аналіз даних, приведених у таблиці 3.1 свідчить про таке:

1) величина магнітоопору для свіжосконденсованих зразків не залежить від геометрії вимірювання, при цьому польові залежності магнітоопору не виходять на насичення навіть при прикладанні зовнішнього магнітного поля до 600 мТл.

2) збільшення загальної товщини зразків з 60 до 100 нм призводить до зростання величини МО з 1,0 до 1,7 %.

3) термообробка композитних матеріалів на основі пермалою та срібла за температури 500 К та 700 К призводить до падіння амплітуди магнітоопору. Це ймовірно пов'язано з дифузійними процесами, які відбуваються у процесі термообробки та призводять до коалесценції магнітних наногранул та зміною їх магнітного стану. Відбувається перехід супермарамагнітний стан \rightarrow однодоменний стан \rightarrow багатодоменний стан. У наслідок формування багато доменних кристалів феромагнітної речовини форма польових залежностей магнітоопору змінюється від ізотропної до анізотропної.

3.2 Чутливість до змін магнітного поля

Аналіз розрахункових результатів величини S_B , приведених у таблиці 3.2 свідчить про:

1) Максимальна величина S_B у свіжо сконденсованих зразках становила 3,09 %/Тл.

2) Для всіх зразків процес відпалювання до 500 К приводить до погіршення чутливості до магнітного поля систем. Максимальне значення чутливості для даної температури відпалу становила 2,33 %/Тл.

3) Практично для всіх зразків при відпалюванні до температури 700 К значення чутливості ще більше зменшується. Тим не менш максимальне значення чутливості за температури 700 К становило 6,38 %/Тл.

4) Характер зміни S_B у процесі відпалювання прямо пов'язаний як зі змінами у вигляді польових залежностей, так і змінами величини МО.

Таблиця 3.2 – Чутливість тонкоплівкових систем на основі пермалою $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та Ag після термовідпалювання до $T_{\text{в}} = 300, 500, 700 \text{ K}$

Зразок	$S_{\text{в}}, \%/ \text{Тл}$								
	Поздовжня геометрія			Перпендикулярна геометрія			Поперечна геометрія		
	300	500	700 K	300	500	700 K	300	500	700 K
60 нм	1,68	0,74	0,41	1,81	1,69	1,74	1,9	1,71	0,75
80 нм	2,49	0,69	1,14	2,41	1,82	1,42	2,69	1,29	0,65
100 нм	2,98	2	2,38	3,02	2,16	2,24	3,09	2,33	0,99

Досліджувані системи залежно від товщини немагнітного шару та режиму термооброблення можуть задовольняти вимоги, які висувають як до датчиків їх високою швидкістю реагування на зміну магнітного потоку, так і при створенні стабільних датчиків, основною функцією яких є детектування слабких магнітних полів.

ВИСНОВКИ

1. В основі принципу роботи чутливих елементів сенсорів магнітного поля лежать ефекти, серед яких можна виділити ефекти анізотропного та гігантського магнітоопору, ефект Холла, та ефект гігантського магнітоімпедансу.

2. Основними галузями застосування композитних матеріалів типу ферромагнітний-немагнітний метал є сенсори магнітного поля різного призначення: сенсори магнітного поля, електричного струму, тиску та інших неелектричних величин.

3. Величина магнітоопору для свіжосконденсованих зразків не залежить від геометрії вимірювання, при цьому польові залежності магнітоопору не виходять на насичення навіть при прикладанні зовнішнього магнітного поля до 600 мТл, збільшення загальної товщини зразків з 60 до 100 нм призводить до зростання величини МО з 1,0 до 1,7 %.

4. Термообробка композитних матеріалів на основі пермалою та срібла за температури 500 К та 700 К призводить до падіння амплітуди магнітоопору. Це ймовірно пов'язано з дифузійними процесами, які відбуваються у процесі термообробки та призводять до коалесценції магнітних наногранул та зміною їх магнітного стану.

5. Максимальна чутливість у досліджуваних композитних матеріалів 3%/Тл отримана для зразка після відпалювання загальною товщиною 100 нм. У процесі термовідпалювання спостерігається зменшення величини S_B для всіх зразків. У цілому за величиною S_B композитні матеріали типу ферромагнетик – немагнітний метал задовольняють вимогам, що висувуються до датчиків з високою швидкістю реагування на зміну магнітного потоку, а також для датчиків, основною функцією яких є детектування слабких магнітних полів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куницький Ю.А., Курилюк В.В., Однодворець Л.В., Проценко І.Ю.. Основи спінтроники: Матеріали, прилади та пристрої. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 127 с.
2. Товстолиткін О.І, Боровий М.О., Курилюк В.В., Куницький Ю.А.. Фізичні основи спінтроники. – Вінниця: Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
3. Victor Manuel Garcia-Chocano, Hector Garcia-Miquel. DC and AC linear magnetic field sensor based on glass coated amorphous microwires with Giant Magnetoimpedance // J. Magn. Magn. Mater. – 2014. – V. 378. – P. 485-492.
4. Panina L.V., Makhnovskiy D.P. Magnetoimpedance in Multilayered Films for Miniature Magnetic Sensor // Reference Module Mater. Sci. Mater. Eng. – 2017. – P. 1-3.
5. Takayama A., Umehara T., Yuguchi A. et. al. Integrated thin film magnetoimpedance sensor head using plating process // IEEE Trans. Magn. – 2002. – V.35. – P. 3643–3645.
6. Kaniukov E., Bundyukova V., Yakimchuk D. et. al. Radiation-resistant magnetic field sensors based on $\text{SiO}_2(\text{Ni})/\text{Si}$ structures // Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B. – 2018. – V. 460. – P. 209-211.
7. Longfeng Luo, Shengli Pu, Shaohua Dong et. al. Fiber-optic magnetic field sensor using magnetic fluid as the cladding // Sens. Actuat. A: Phys. – 2015. – V. 236. – P. 67-72.
8. Roy A., Anil Kumar P.S. Giant planar Hall effect in pulsed laser deposited permalloy films // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – V.43, No 36. – 365001
9. Jen S.U., Wang P.J., Tseng Y.C. et. al. Planar Hall effect of Permalloy films on Si(111), Si(100), and glass substrates // J. Appl. Phys. – 2009. – V.105 – P. 07E903.
10. Montaigne F., Schuhl A., Van Dau F.N. et. al. Development of magnetoresistive sensors based on planar Hall effect for applications to microcompass // Sens. Actuat. A: Phys. – 2000. – V.81 – P. 324–327.

11. Arnab Roy, Sampathkumar P., Anil Kumar P.S. Development of a very high sensitivity magnetic field sensor based on planar Hall Effect // Measurement – 2020. – V. 156. – 107590.
12. Florian Niekiet, Jingxiang Su, Mani Teja Bodduluri et. al. Highly sensitive MEMS magnetic field sensors with integrated powder-based permanent magnets // Sens. Actuat. A: Phys. – 2019. – V. 297. – P. 111560.
13. Vijay V. Kondalkar, Xiang Li, Sangsik Yang et. al. Current sensor based on Nanocrystalline NiFe/Cu/NiFe Thin Film // Procedia Engineering – 2016. – V. 168. – P. 675-679.
14. Umesh P. Borole, Sasikala Subramaniam. Ishan R. Kulkarni et. al. Highly sensitive giant magnetoresistance (GMR) based ultra-low differential pressure sensor // Sens. Actuat. A: Phys. – 2018. – V. 280. – P. 125-131.
15. X. Yang, H. Liu, Y. Wang et. al. A Giant Magneto Resistive (GMR) Effect Based Current Sensor With a Toroidal Magnetic Core as Flux Concentrator and Closed-Loop Configuration // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2014. – V 24. – P. 9000305.
16. H.Y. Yu, M. Qin, M. Nie et. al. A MEMS pressure sensor based on Hall effect // IEEE SENSORS Proceedings, Limerick – 2011. – P. 218–221.
17. Spencer Eisenbarth. Electronic Pressure Transducer. – 2004. Patent No. – US2004/0093952 A1.
18. Gilbert Erdler. Magnetic Pressure Sensor. – 2014. Patent No. – US8, 664,732 B2.
19. Псевдоспін-вентильні структури: принципи формування, магніті та магніторезистивні властивості / І. М. Пазуха, С. І. Проценко, І. В. Чешко, Ю. О. Шкурдода ; за заг. ред. проф. С. І. Проценка та доц. І. М. Пазухи – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 157 с
20. Influence of quantum effects on giant magnetoresistance for multilayer structures / X. H. Zeng, H. X. Chen, X. L. Xu et al. // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 94, No. 1. – P. 507–513.